

## 带道路容量动态约束的关联运输调度问题

汤雅连,蔡延光,徐山峰

(广东工业大学 自动化学院,广东 广州 510006)

**摘要:**介绍了混沌遗传算法的基本原理,并对其进行改进,自适应地调整交叉概率和变异概率,引进了模拟退火机制,用聚类分析及改进的算法对多车场的关联运输调度问题进行求解,然后与遗传算法求解此模型的结果相比较。实例证明该算法求解关联运输调度问题是可行的,且优于传统的遗传算法。

**关键词:**混沌遗传算法;关联运输调度问题;模拟退火机制;聚类分析

中图分类号: TP301

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2012)22-0073-04

## Incident vehicle routing problem with road capacity dynamic constraint

Tang Yalian, Cai Yanguang, Xu Shanfeng

(School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** The fundamental principle of CGA (Chaos Genetic Algorithm) was introduced and modified, adjusting self-adaption crossover probability and mutation probability, moreover, simulated annealing mechanism was brought in the algorithm, and then cluster analysis and the modified algorithm were applied to solve multi-depot IVRP (Incident Vehicle Routing Problem). At the same time, Genetic Algorithm (GA) was applied too. The result shows that CGA is flexible to solve IVRP, and it's better than GA during the optimization process.

**Key words:** chaos genetic algorithm; IVRP; simulated annealing mechanism; cluster analysis

多车场的关联物流运输调度问题是对基本物流运输调度问题的拓展,一般是若干个客户有一定的货物需求,有多个车场为所有客户提供配送服务,车场中车辆将货物送到各个客户,然后返回车场。要求对车场的车辆和行驶路线进行合理安排,在满足用户需求的条件下使配送成本最低。关联运输调度问题 IVRP (Incident Vehicle Routing Problem) 根据车辆类型可以分为单车型 IVRP 和多车型 IVRP, 本文主要研究多车场单车型的关联物流运输调度问题。

复杂产品<sup>[1]</sup>一般首先由不同设计院、不同部门、不同地域的群组共同协作设计模型,然后由相关加工部门制造出所需的零部件,最后组装而成。同理,在产品的制造过程中,需要将产品分解成许多独立的零部件,并将生产任务分配给相应的制造部门,然后合理安排生产进度,确保总工艺的产品质量和效率。对一些在时间上存在先后顺序的过程,工序的先后对应着时间的先后,工艺流程的这种联系称为时间关联。在实际产品的研发制造过程中,各任务的时间关联关系可分为多种情况,如图 1

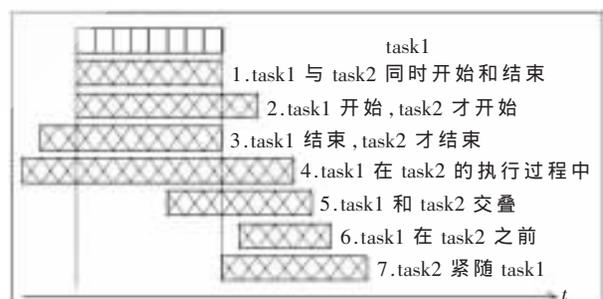


图 1 task1 和 task2 之间的时间关联

所示。其中,1~4 属于并行执行,5~7 属于串行执行。

## 1 数学模型的建立

### 1.1 问题描述及假设

带道路容量动态约束的多车场关联运输调度问题是车辆路径问题的延伸,与车辆路径问题具有相似性。问题可以简单描述为,假设给定车场位置以及客户的数量、位置和成品需求总量,车辆有载重约束、运输里程约束和道路约束,要求合理安排车场中的车辆和运输路线,使得配送成本最低。本文研究的问题基于以下假设:

## 技术与方法 Technique and Method

(1) 1 个车场,  $l$  个客户 ( $i, j=1, 2, \dots, l$ ), 客户需求不确定; (2) 每辆车有最大配送距离约束、载重约束, 同种车型; (3) 非满载, 软时间窗约束和道路容量动态约束; (4) 考虑货物性质关联、需求关联及时间序列关联。

### 1.2 模型的建立

有  $l$  个客户, 第  $i$  个客户的货运量为  $Q \cdot \chi_i \cdot g_i$ , 需要从车场将货物运给各客户, 有多个车场可派出载重量为  $q$  的货车, 已知  $Q \cdot \chi_i \cdot g_i < q$ 。客户要求送货时间窗为  $[et_i, lt_i]$ , 每小时等待费用和延迟费用分别为  $c_1$  和  $c_2$ , 车辆早到或者晚到会受到惩罚。  $T_i$  表示车辆到达客户  $i$  的时间。不考虑服务时间和吃饭时间。可以按照式(1)估算车辆数。

$$m = [\sum Q \cdot \chi_i \cdot g_i / \alpha q] + 1 \quad (1)$$

其中,  $[\ ]$  表示不大于括号内数字的最大整数;  $0 < \alpha < 1$ , 是对装车(或卸车)的复杂程度及约束多少的估计。

以  $c_i^{nk}$  表示车场  $n$  中的车辆  $k$  将货物送到点  $i$  的单位运价; 客户  $i, j$  之间的距离为  $d_{ij}$ ; 车场编号为  $1, 2, \dots, N$ ; 关联系数为  $r, r_{ij}$  表示点  $i$  处的货物与点  $j$  处货物的关联系数; 假设时空资源消耗为  $C_k$ ;  $L$  为货车行驶过程中的平均车头间距;  $t_k$  为车辆行驶时间。目标为使车辆的总运输成本最小。

定义变量如下:

$$x_{ij}^{nk} = \begin{cases} 1 & \text{车场 } n \text{ 的车辆 } k \text{ 由点 } i \text{ 行驶到点 } j \\ & (i, j=1, 2, \dots, l, i \neq j) \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (2)$$

$$y_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{点 } i \text{ 的货运任务由车辆 } k \text{ 完成} \\ & (i=1, 2, \dots, l) \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (3)$$

建立数学模型, 目标函数:

$$\min z = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l d_{ij}^{nk} x_{ij}^{nk} Q(\chi_i g_i c_i^{nk} + \chi_j g_j c_j^{nk}) + d_{ij} \times (1 - \prod_{i=1}^l r_{ij}) + c_1 \times \sum_{i=1}^l \max(et_i - T_i) + c_2 \times \sum_{i=1}^l \max(T_i - lt_i) \quad (4)$$

约束条件:

$$\sum_{n=1}^N d_{ijk} \leq D_{\max} \quad i, j=1, 2, \dots, l \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^l x_{ijk} = y_{jk} \quad j=1, 2, \dots, l; k=1, 2, \dots, m \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^l x_{ijk} = y_{ik} \quad i=1, 2, \dots, l; k=1, 2, \dots, m \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^l x_{ij}^{nk} = \sum_{j=1}^l x_{ji}^{nk} \leq 1 \quad k=1, 2, \dots, m; n=1, 2, \dots, N \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^N x_{ij}^{nk} = \sum_{j=1}^N x_{ji}^{nk} = 0 \quad k=1, 2, \dots, m; n=1, 2, \dots, N \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^l (g_i \cdot Q \cdot \chi_i) \sum_{j=1}^N x_{ij}^{nk} \leq q \quad k=1, 2, \dots, m; n=1, 2, \dots, N \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l x_{ijk} \leq l \quad k=1, 2, \dots, m \quad (11)$$

$$t_{ij} = w_{ij} \frac{d_{ij}}{v} \quad i, j=1, 2, \dots, l \quad (12)$$

$$L \cdot t_k \leq C_k \quad k=1, 2, \dots, m \quad (13)$$

$$S_a \leq S_b, (a, b) \in T_L, T_L \subseteq \{(i, j) | i, j=1, 2, \dots, l\} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \chi_5 + \chi_6 + \chi_7 + \chi_9 + \chi_{10} + \chi_{12} \geq 12 \\ \chi_1 + \chi_3 + \chi_8 + \chi_{11} \geq 4 \\ \chi_2 + \chi_4 \geq 6 \\ \chi_5 = \chi_6 = \chi_9 \\ \chi_7 = \chi_{10} = \chi_{12} \\ \chi_9 \leq 2 \end{cases} \quad \chi_i \geq 1, i=1, 2, \dots, l, \chi_i \in N \quad (15)$$

目标函数式(4)表示总运输成本最低,  $T_i$  表示车辆从车场出发, 配送若干个客户后, 到达客户  $i$  的时刻,  $Q$  为预计制造成品的数量,  $\chi_i$  为货物需求关联系数,  $g_i$  为货物单位重量,  $r_{ij}$  为货物性质关联系数, 在此将它作为惩罚函数而不是硬性约束。式(5)为车辆行驶距离约束, 其中  $d_{ijk}$  表示车辆  $k$  行驶了客户  $i$  到  $j$  的路程,  $n$  是车辆  $k$  服务的客户数目, 最大为  $N$ 。式(6)和式(7)表示两个变量之间的关系。式(8)表示车辆完成任务后, 回到原车场。式(9)表示车辆不能从车场到车场。式(10)表示不能超过车辆载重量的限制。式(11)表示保证每辆车的客户总数不大于总客户数目。式(12)  $t_{ij}$  表示从  $i$  到  $j$  的行驶时间,  $w_{ij}$  为路段  $(i, j)$  的路况系数, 主要影响配送时间。式(13)表示每辆车在行驶过程中小于额定时空消耗。式(14)中  $S_a, S_b$  是配送的时间关联序列,  $S_a \leq S_b$  表示配送货物到客户  $i$  的时间必须早于到客户  $j$  的时间。式(15)为需求关联  $\chi_i$  的约束模型, 根据约束求出不同货物的配送件数。

## 2 算法设计

### 2.1 算法思想

模拟退火算法 SA(Simulated Annealing)<sup>[2-3]</sup> 是一种基于热力学的退火机理而建立的随机搜索算法。模拟退火算法的思想<sup>[4]</sup>源于固体退火过程: 将固体加热至充分高, 再让其慢慢冷却。加热时, 固体内部粒子随着温度的升高表现出无序性, 而在降温时, 渐趋有序, 在降温到一定程度时, 内能最小。根据 Metropolis 准则来决定是否接受新个体。本文算法是在混沌搜索产生初始种群后, 对适应度较小的染色体进行交叉和变异操作, 然后引入模拟退火机制, 并与初次产生的种群合成新的种群, 如此反复迭代进行, 直到满足终止条件为止。

### 2.2 混沌遗传算法参数设计

#### 2.2.1 随机扰动的确定

利用混沌<sup>[4]</sup>对初始解敏感的特点, 对全局最优值  $X$

## 技术与方法 Technique and Method

进行混沌搜索,以避免陷入局部最优。本文选用 Logistic 映射<sup>[4]</sup>产生混沌序列,如式(16)、式(17)所示:

$$\beta_i^{(u+1)} = \mu_i \cdot \beta_i^{(u)} (1 - \beta_i^{(u)}) \quad (16)$$

$$S(k) = [N \cdot \beta_i^u] \quad (17)$$

其中, $i$ 表示混沌变量的序号, $i=1,2,\dots,r$ ;  $u$ 表示种群序号, $u=0,1,\dots,n$ ;  $\beta_i$ 表示混沌变量, $0 \leq \beta_i \leq 1$ ;  $\mu_i$ 表示吸引子。当 $\mu_i=4$ 时,Logistic映射完全处于混沌状态,此时产生的混沌变量具有很好的遍历性。

混沌领域搜索的基本步骤:

(1)对式(16)赋予不同的初值,可以得到混沌变量 $\beta_i$ 。

(2)令 $X=(x_1, x_2, \dots, x_r)$ ,  $X'=(x'_1, x'_2, \dots, x'_r)$ ,将 $\beta_i^{(u+1)}$

映射到染色体基因座空间,对应染色体基因片段 $X'=(x'_1, x'_2, \dots, x'_r)$ 。

(3)根据混沌遍历性,搜索有效基因,生成新的个体 $X''=(x''_1, x''_2, \dots, x''_r)$ ,并计算相应的适应值。若 $f(X'') > f(X)$ ,则 $X=X''$ ,如果满足终止条件,搜索结束;否则,转步骤(2)。

### 2.2.2 交叉概率与变异概率的确定

交叉概率 $p_c(t)$ 和变异概率 $p_m(t)$ 由平均适应度 $f_{ave}$ 、最大适应度 $f_{max}$ 和最小适应度 $f_{min}$ 来衡量,如式(18)、式(19)所示。

$$p_c(t) = \begin{cases} p_c \times \frac{1}{1 - \frac{f_{ave}}{f_{max}}}, & \frac{f_{ave}}{f_{max}} > a; \frac{f_{min}}{f_{max}} > b \\ p_c, & \text{其他} \end{cases} \quad (18)$$

$$p_m(t) = \begin{cases} p_m \times \frac{1}{1 - \frac{f_{ave}}{f_{max}}}, & \frac{f_{ave}}{f_{max}} > a; \frac{f_{min}}{f_{max}} > b \\ p_m, & \text{其他} \end{cases} \quad (19)$$

其中, $0.5 < a < 1, 0 < b < 1$ 。 $f_{max}$ 和 $f_{min}$ 的接近程度反映了整个群体的集中程度,两者越接近,越容易陷入局部最优解; $f_{ave}$ 和 $f_{max}$ 的接近程度反映了群体内部适应度的分布情况,二者越接近,说明该代中的个体越集中。

### 2.3 模拟退火混沌遗传算法设计流程

(1)初始化遗传算法参数和模拟退火算法参数;

(2)利用混沌遍历性搜索有效基因,得到种群 $P(t)$ ;

(3)计算适应度值,若达到给定迭代次数,转步骤(7);否则,计算下一步;

(4)根据适应度集中程度,进行自适应交叉变异操作;

(5)进行模拟退火操作,计算适应度增量 $\Delta f$ ,根据Metropolis准则判断是否接受新点,产生新种群 $P'(t)$ ;

(6)为保证种群的多样性,将 $P'(t)$ 加入,则新群体 $P''(t)=P(t)+P'(t)$ ;

(7)判断是否满足终止条件,若满足,算法结束;否则转步骤(3)。

### 2.4 聚类分析

在本文的多车场IVRP问题中,车辆分别从 $N$ 个车场出发,为 $M$ 个客户配送货物。根据车场与客户的相对位置进行聚类划分。把 $N$ 个车场分成独立的车场,每个车场为不同的客户提供服务,这样可以缩短时间。客户到各车场的位置称之为亲密度 $Close$ ,车场为亲密度高的客户服务。 $\varphi$ 为距离加权系数, $\beta$ 为载重加权系数, $M(n)$ 为已经分配给车场 $N$ 的客户数。

$$d_{nm} = \sqrt{(x_m - x_n)^2 + (y_m - y_n)^2} \quad (20)$$

$$Aff(m, n) = \frac{\sum_{m \in M, n \in N} (e^{-\varphi D_{mn}} + e^{-\beta G_{mn}})}{M(n) + 1} \quad (21)$$

$$Close(m, n) = \frac{Aff(m, n)}{d_{nm}} \quad m \in M, n \in N \quad (22)$$

实现步骤:

(1)以 $N$ 个车场作为对象,代表 $N$ 个中心;

(2)每个客户到车场的距离为 $d_{nm}, m \in M, n \in N$ ;

(3)将 $Close(m, n)$ 按从大到小排序,将客户 $m$ 分配到相应的车场 $N$ 中;

(4)每次分配客户时需验证载重及里程是否满足约束,若不满足约束条件,修改 $Close(m, n)$ ;

(5)直到 $M$ 个客户分配完毕,算法结束。

### 3 仿真分析

根据市场需求,某公司需要制造某种产品50件,该产品由12种原材料分别加工成配件组装构成。该公司将配送原材料的业务指派给表1车场位置信息表1个物流中心。该物流中心有3个车场,如表1所示。需将12种原材料配送给相应的加工中心(客户),原材料信息如表2所示,坐标位置如图2所示。货物之间性质关联系数 $r_{ij}$ 和路况系数由Matlab7.1随机产生。每辆车的正

表1 车场位置信息表

车场编号	坐标位置
A	(40, 40)
B	(0, 0)
C	(30, 30)

表2 原材料信息表

原材料编号	位置	单位重量/t	时间序列	单位定价/(元/t×km)
1	(7, 16)	0.024	[8:00, 10:00]	0.2
2	(8, 10)	0.044	[9:00, 10:00]	0.5
3	(43, 44)	0.035	[8:00, 11:00]	0.2
4	(22, 24)	0.026	[9:00, 11:00]	0.5
5	(20, 16)	(20, 16)	[9:00, 17:00]	0.3
6	(40, 25)	(40, 25)	[8:00, 9:00]	0.3
7	(38, 50)	0.056	[8:00, 13:00]	0.3
8	(12, 35)	0.032	[12:00, 17:00]	0.2
9	(9, 4)	0.018	[10:00, 14:00]	0.3
10	(41, 32)	0.029	[9:00, 14:00]	0.3
11	(18, 29)	0.034	[9:00, 10:00]	0.2
12	(25, 40)	0.055	[10:00, 11:00]	0.2

## 技术与方法 Technique and Method

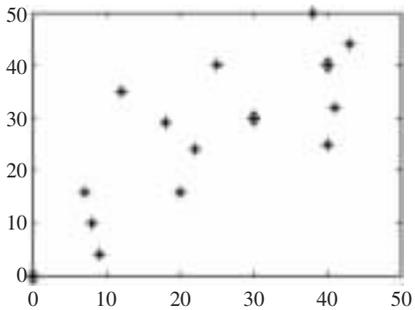


图2 客户及车场位置

常行驶速度为 40 km/h, 车辆等待费用为 10 元/h, 车辆延迟费用为 100 元/h, 不考虑吃饭时间。已知车辆最早发车时间为 8:00。每个车场都有载重 14 t 的车辆若干, 最大配送距离为 100 km。 $C_k$  为 2.25 km·h,  $L$  为 100 m。

本实例采用 Microsoft Visual C++6.0 编程实现。假设初始温度  $T=100$ ,  $T_0=0$ ,  $\alpha=0.8$ ,  $\varphi=0.9$ ,  $\beta=0.1$ , 群体规模  $N=20$ , 迭代次数为 300,  $p_c=0.8$ ,  $p_m=0.05$ 。运行程序 20 次, 得出算法运行结果。在第 104 次迭代后, 算法收敛。得到各种货物需求量如表 3 所示。聚类效果图如图 3 所示。具体配送信息如表 4 所示, 各车场分别派出一辆车, 总配送距离为 167.10 km, 总配送费用为 992.7 元。最优配送网络如图 4 所示。

本文研究了带道路容量动态约束的多车场并具有多种关联特征的运输调度问题模型, 将货物性质关联的硬性约束以惩罚形式加入到目标函数中, 并设计了一种

表3 各种货物需求量

$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$	$X_{10}$	$X_{11}$	$X_{12}$
1	3	1	3	2	2	2	1	2	2	1	2

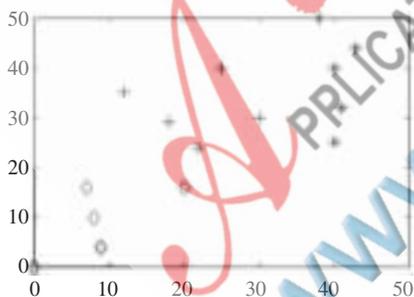


图3 聚类效果图

表4 最优配送方案

路径	时间/h	里程/km	时间窗惩罚/元	性质关联惩罚/元	总费用/元
A-3-7-6-10-A	0.87	53.0	8.3	23.5	215.8
B-1-2-5-9-B	1.72	63.1	7.3	32.4	513.0
C-4-11-8-12-C	2.13	50.0	16.2	34.7	263.9
合计		167.1	31.8	68.2	992.7

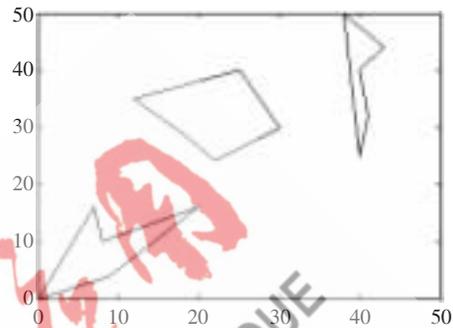


图4 最优配送网络

改进的混合混沌遗传算法对所建立的模型求解, 根据适应度集中程度, 自适应地调整交叉概率和变异概率, 然后引入了模拟退火机制, 并加入了混沌扰动。该混合算法兼容了混沌遗传算法和模拟退火算法的优点, 能有效地求解此类问题。

## 参考文献

- [1] 韩瑞峰. 遗传算法原理与应用实例[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2010: 211-216.
- [2] 魏明, 蔡延光. 一种基于混沌领域搜索的自适应遗传算法[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(2): 465-467.
- [3] 周丽, 黄素珍. 基于模拟退火的混合遗传算法研究[J]. 计算机应用研究, 2005, 22(9): 72-74.
- [4] 谢云. 模拟退火算法综述[J]. 计算机应用研究, 1998, 15(5): 6-9.

(收稿日期: 2012-05-26)

## 作者简介:

汤雅连, 女, 1986年生, 博士研究生, 主要研究方向: 物流信息技术与应用。

蔡延光, 男, 1963年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 组合优化、人工智能、决策支持系统。

徐山峰, 男, 1987年生, 硕士研究生, 主要研究方向: 物流信息技术与应用。